

## Entwicklungen der Windenergie – wo stehen wir?

Die Windenergienutzung ist heute integraler Bestandteil der deutschen Energieversorgung und stellt aktuell (2016) mit rund 80 TWh etwa 12% der benötigten elektrischen Energie bereit [1,2]. Die installierte Leistung wuchs in Deutschland bis Ende 2016 auf etwa 50 GW und international auf rund 487 GW, davon 14 GW offshore [1]. Bei angenommenen, durchschnittlichen 2.000 Volllaststunden ergäbe sich weltweit eine aus Wind generierte elektrische Energiemenge in Höhe von etwa 1.000 TWh.

Für ein zukünftiges Energieversorgungssystem, das sich mehr und mehr auf erneuerbare Energien stützt und einen substantziellen Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes leistet, muss die Windenergienutzung aber noch erheblich ausgebaut werden [3]. Neuere Szenarien gehen bis 2050 von ca. 300 TWh Windstromerzeugung in Deutschland [4] und 8.800 TWh [5] bzw. 15.000 TWh [6] weltweit aus. Für Deutschland würde dies eine Steigerung der aktuellen Energiemenge aus Wind auf das rund Fünffache innerhalb der kommenden 35 Jahre und weltweit eine Steigerung auf das rund Fünfzehnfache bedeuten.

Der folgende Beitrag basiert zum Teil auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens TF\_Energiewende bzw. auf dem in dessen Rahmen entstandenen Technologiebericht Windenergie (Veröffentlichung in einem Gesamtbericht steht bevor). Dort wird angenommen, dass für den genannten Ausbau wesentliche Herausforderungen zunächst darin bestehen, geeignete Standorte zu identifizieren und optimal auszunutzen sowie gezielt für die lokalen/regionalen Bedingungen ausgelegte und technisch weitgehend optimierte Anlagen bereitzustellen. Zusätzlich sind die Prozesse von Betriebsführung und Instandhaltung kostenoptimal zu gestalten und alle Umwelteinflüsse der Windenergienutzung so weit wie möglich zu reduzieren bzw. Akzeptanz für die unvermeidlichen Auswirkungen zu schaffen.

Die meisten Entwicklungsansätze werden letztendlich durch den allgegenwärtigen Kostendruck angetrieben. Dieser führt nach wie vor zu einem Größenwachstum der Anlagen, sodass die zukünftigen Entwicklungsnotwendigkeiten vor dem Bild einer aus heutiger Sicht extrem großen 20 MW-Windenergieanlage (WEA) abzuschätzen sind.

Akzeptanz- und Umweltaspekte sind hingegen nicht aus Kostengründen oder aufgrund technischer

Herausforderungen zu thematisieren, sondern zur bestmöglichen Umsetzung gesellschaftlicher Werte wie Umwelt- und Gesundheitsschutz. Für Erhaltung und Ausbau der Akzeptanz müssen mögliche Auswirkungen der Windenergie auf Mensch und Umwelt untersucht und reale, unerwünschte Effekte reduziert bzw. eliminiert werden.

### Bewertung der Windenergie-Technologie anhand objektiver Kriterien

Auf Basis der Vorgaben im oben genannten Projekt wurden verschiedene Aspekte der Windenergienutzung und zwölf konkrete Bewertungskriterien untersucht. Beispielhaft folgen die Ergebnisse zu fünf ausgewählten Kriterien.

#### Beitrag zur Energieeinsparung

Die Windenergie soll zukünftig einen großen Teil der elektrischen Energieversorgung übernehmen. Die Auswertung diverser Szenarien kommt zu dem Schluss, dass 2050 in Deutschland im günstigsten Fall etwa 1400 bis 2000 PJ (rund 390 bis 550 TWh) elektrische Energie durch Windenergieanlagen bereitgestellt werden können.

#### Beitrag zu Klimazielen

Da der CO<sub>2</sub>-Ausstoß je Energieeinheit verglichen mit anderen Ressourcen und Technologien beinahe verschwindend gering ist, ist der Windenergie zukünftig auch ein großer Anteil an der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zuzuschreiben. So kann die Windenergienutzung ab 2050 über 300 Mio. t CO<sub>2</sub> einsparen (bei rund 900 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent 2015).

#### Rohstoffrisiken

Durch die zunehmende Verwendung von permanent-erregten Generatoren und durch den damit verbundenen Bedarf an seltenen Erden entsteht ein leichtes Rohstoffrisiko. Da der mengenmäßige Bedarf verglichen mit anderen Technologien aber relativ klein ist und mit Kupfer oder Aluminium Ersatzrohstoffe existieren, bleibt das mit der Windenergie verbundene Rohstoffrisiko gering.

#### Kosteneffizienz

Unter den Rahmenbedingungen des EEG haben die Wind- und Solarenergie in den vergangenen Jahren erheblich zur Preisreduktion an den Strombörsen beigetragen und die letzten Ausschreibungen in



Fraunhofer IEE  
Berthold Hahn  
berthold.hahn@iee.fraunhofer.de



DLR  
Dr. Sarina Keller  
sarina.keller@dlr.de

UFZ  
Dr. Raik Becker  
raik.becker@ufz.de

ZSW  
Andreas Rettenmeier  
andreas.rettmeier@zsw-bw.de

Deutschland haben gezeigt, dass diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist. Die Prognosen gehen davon aus, dass sich im progressiven Ausbauszenario im Vergleich zu einem Referenzszenario ab 2050 eine Einsparung von bis zu 40 Mrd. € jährlich ergeben kann. Selbst das pessimistische Szenario verspricht noch eine Einsparung von über 15 Mrd. € jährlich.

### Marktpotenziale

Das mit dem Umbau des Energieversorgungssystems verbundene Marktpotenzial ist für deutsche Unternehmen beträchtlich. In einem zurückhaltenden Szenario werden jährliche Investitionen in Höhe von knapp 2 Mrd. € erwartet, im progressivsten Szenario sogar fast 7 Mrd. €. Hinzu kommen die internationalen Marktpotenziale.

Insgesamt kam die genannte Studie zu dem Ergebnis, dass sich die Windenergienutzung aus folgenden Gründen für eine tragende Rolle in der zukünftigen Energieversorgung empfiehlt:

- hohes technisches Potenzial
- großer Beitrag zur Klima- und Ressourcenschonung
- niedrige Stromgestehungskosten
- relativ geringe Auswirkungen auf Umfeld und Umwelt

### Technische Verbesserungspotenziale bei der Standortfindung

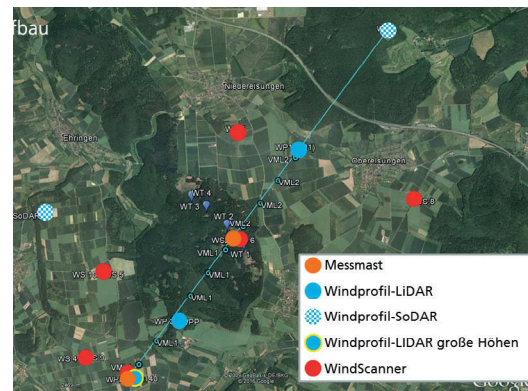
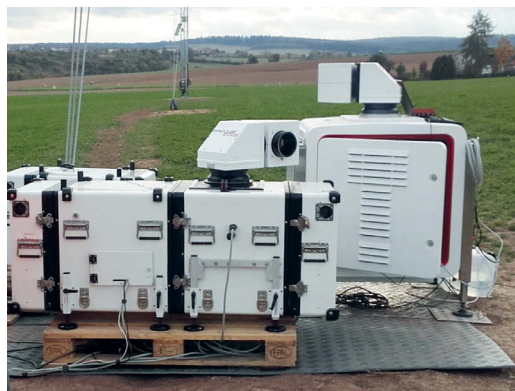
Der erwartete große Beitrag der Windenergie zur Energieversorgung und die begrenzten Flächenpotenziale setzen eine optimale Nutzung geeigneter Standorte voraus. Für die Windenergienutzung an Land und auf See sind die Fragestellungen dabei durchaus verschieden. An Land spielen vor allem der Geländeeinfluss (komplexes Gelände) und die großen Höhen eine Rolle. Offshore sind eher die Auswirkungen von thermischen Effekten (Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft) sowie die Auswirkung der Nachlaufströmung von WEA auf die

Windbedingungen innerhalb und zwischen Windparks eine Herausforderung.

Bei wachsender Anlagengröße und weiteren bisher unerschlossenen Standorten an Land wird die Bestimmung der äußeren Einflussgrößen auf die WEA immer wichtiger, um den Ertrag so genau wie möglich abschätzen zu können. Hierbei gilt es, die meteorologischen Umgebungsgrößen zu bestimmen und vorherzusagen. Die erforderlichen in-situ-Messungen werden zunehmend mit Fernerkundungsverfahren wie SoDAR (Sonic Detection and Ranging) und LiDAR (Light Detection and Ranging) durchgeführt, doch weisen diese sehr attraktiven Messmethoden gerade in bergigem Gelände noch Messfehler auf. Zum Teil können die Fehler bereits heute mit Hilfe numerischer Strömungssimulationen eliminiert werden, zukünftig soll die Kopplung der mikroskaligen und der mesoskaligen Windfeldmodellierung auf Basis momentaner Wetterdaten die Vorhersage des Windertrags verbessern. Ein wichtiger nächster Schritt ist die Synchronisation mehrerer LiDAR-Geräte zu Multi-LiDAR-Systemen, mit denen die Windbedingungen über potenziellen Windpark-Areale quasi flächendeckend und in allen relevanten Höhen über Grund mit einer einzelnen Messkampagne vermessen werden können.

Je mehr bisher vermiedene Regionen für eine zukünftige Nutzung in Betracht gezogen werden, umso eher rücken auch Gründung und Fundament in den Fokus. Im Fundament werden alle Kräfte und Momente abgefangen, welche durch den Staudruck des Windes und die Gewichtskraft der Anlage entstehen, wodurch der Gründung natürlich eine besondere Bedeutung zukommt. Gerade in Gebieten mit Karstgestein können sich Hohlräume oder Dolinen ausbilden, welche bei unsachgemäßer Standortwahl die Standsicherheit der WEA gefährden. Die Detektion solcher nicht-tragenden Untergründe ist mitunter schwierig und die bekannten Messmethoden sind zum Teil noch ungenau.

Abbildung 1  
LiDAR-Scanner (links)  
und Messaufbau mit  
mehreren Multi-LiDAR-  
Systemen (rechts)  
für das Kassel-  
Experiment im euro-  
päischen Vorhaben  
„Neuer Europäischer  
Windatlas“ (NEWA)  
[Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]



## Anstehende Komponentenentwicklung mit Blick auf Kostenreduktion, Effizienzsteigerung und Minimierung der Umweltauswirkungen

Aktuell werden verschiedene Turmkonzepte mit verschiedenen Werkstoffen für unterschiedliche Nabenhöhen entwickelt, wie z.B. Fertigbetonteiltürme mit faserverstärkten Feinkornbetonen, Türme in Hybridbauweise oder Gittermasttürme. Neuartige Methoden bei der Nachbehandlung von Schweißnähten von Stahltürmen, aber auch von Gründungsstrukturen für den Offshore-Einsatz, verlängern die Lebensdauer des Materials und erhöhen somit die Standfestigkeit.

Eine geringe Turmkopfmasse birgt nicht nur Potenzial zur Kostenreduktion bei der Maschine selbst sondern auch Vorteile für den Turm sowie für Fundament bzw. Offshore-Tragstruktur. Es wird u. a. an gestaltungsoptimierten Maschinenträgern aus Gussstahl gearbeitet und an Naben aus Faserverbundwerkstoffen. Leichtbau ist auch das Ziel bei der Weiterentwicklung der Rotorblätter. Die Länge der Blätter wird weiter stetig steigen, sodass auch Kohlenstofffasern zum Einsatz kommen, um einerseits für ausreichend Steifigkeit zu sorgen und andererseits das Gewicht zu begrenzen. Weiteres Entwicklungspotenzial besteht beim strukturellen Aufbau der Rotorblätter. So kann durch den Einsatz moderner dreidimensionaler Textiltechniken, wie Flechten, Sticken und Nähen der Aufbau punktuell bei reduziertem Masseneinsatz verstärkt werden.

CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) spielen eine große Rolle im Bereich der Anlagenkonstruktion und Rotorblattauslegung. Eine adaptive Strömungsbeeinflussung mit sogenannten „smart blades“ kann die Auftriebseigenschaften während des Betriebs verändern: entweder passiv durch eine Biege-Torsionskopplung oder aktiv durch Aktuatoren (Antriebs-elemente) wie Flaps (Klappen). Die Einbindung dieser Systeme in die Anlagenregelung und -steuerung stellt zwar einen hohen Aufwand dar, doch steckt in diesem Bereich ein sehr großes Potenzial, die Lasten zu reduzieren und die Leistung zu steigern, vor allem in Verbindung mit einer prädiktiven Regelung.

In der mechanisch-elektrischen Energiewandlung sind Synchrongeneratoren, die entweder über ein Getriebe oder direkt mit der Nabe verbunden werden, auf dem Vormarsch. Grund hierfür ist die einfachere Bereitstellung von Blindleistung, was für die einzelne WEA, und auch für einen Windpark im Gesamten bzgl. des Netzanschlusses von Vorteil ist. Hier kommen zunehmend Generatoren mit permanentmagnetischer Erregung, zum Einsatz, was wie-

derum zu einer geringeren Turmkopfmasse führt. Zum Nachteil könnten hier die für die Magnete notwendigen Seltenen Erden führen.

Auch die Generatoren selbst bergen noch Potenzial zu Gewichtsreduktion und Effizienzsteigerung. Der neu entwickelte Prototyp eines Magnetrings-Generators verspricht eine erhebliche Gewichtsreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Vielpol-Generatoren bei gleichbleibender Effizienz.

Eine andere Entwicklungsschiene beschäftigt sich mit hocheffizienten, supraleitenden Generatoren.

Auch in der Anlagenregelung steckt noch Potenzial zur Effizienzsteigerung. Mithilfe von LiDAR-Messungen und CFD-Simulationen soll zukünftig das herannahende turbulente Windfeld erfasst bzw. eingeschätzt werden, bevor es auf die WEA trifft. Dies ermöglicht es, rechtzeitig zu agieren und nicht – wie im konventionellen Fall – auf Böen erst im Nachhinein zu reagieren. In Hinblick auf den Einsatz der Technologie in Windparks oder in bergig komplexem Gelände bietet die adaptive Vorsteuerung zusammen mit der sogenannten Einzelblattsteuerung („Individual Pitch Control“) das Potenzial, auch die Schallemissionen zu senken.

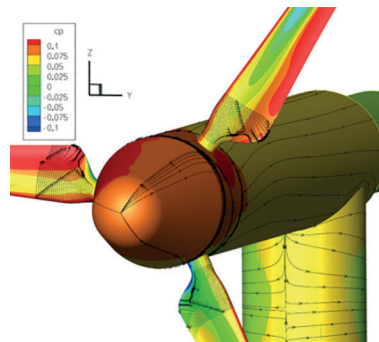


Abbildung 2  
**Numerische Strömungsberechnung an einer WEA**  
[Quelle: IAG, Universität Stuttgart]



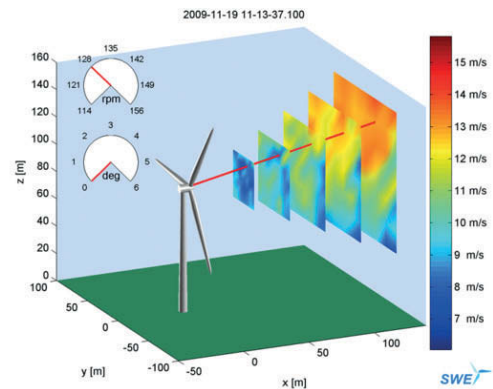
Abbildung 3  
**Magnetrings-Generator im Labormaßstab (176 kW)**  
[Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]



Abbildung 4  
**LiDAR-Scanner auf der Gondel einer 5MW WEA (links)**

**Visualisierte Messdaten des herannahenden Windfelds (rechts)**

[Quelle: Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE), Universität Stuttgart]



Leistung und die regelungstechnische Nachbildung „virtueller Rotationsenergie“.

Diese zukünftigen Aufgaben sowie die stark volatilen Eigenschaften der Windenergie und der anderen erneuerbaren Energien regen in der jüngeren Vergangenheit immer mehr Ansätze der virtuellen Kopplung der einspeisenden Anlagen sowie eine Kopplung der Verbrauchssektoren an. Ferner werden Konzepte für eine Integration dezentraler Erzeugungsanlagen in den Netzwiederaufbauprozess nach einem Blackout erarbeitet sowie die notwendigen Funktionalitäten auf Anlagenebene abgeleitet.

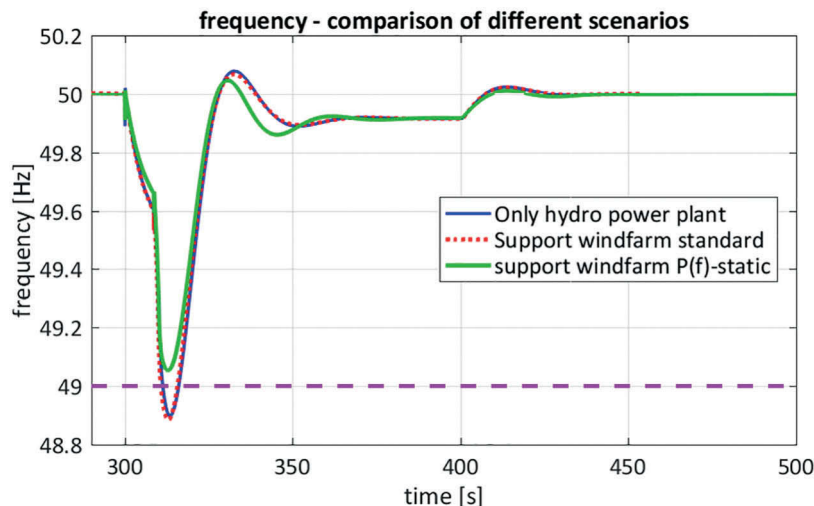
Der Anteil der Betriebs- und Instandhaltungskosten an den Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity = LCOE) aus Windenergie bewegt sich onshore und offshore um 25%. Die Zuverlässigkeit der Anlagen und ihrer Komponenten nahm zuletzt sogar ab, sodass Instandhaltungsaufwand und -kosten gestiegen sind.

Dieser Entwicklung kann zielgerichtet entgegengewirkt werden, indem die Erfahrungen aus Betrieb und Instandhaltung systematisch analysiert und für zukünftige Generationen von WEA verfügbar gemacht werden.

### Entwicklungsbedarf in Betrieb und Instandhaltung

Im Zuge der Transformation des Energieversorgungssystems müssen WEA zunehmend netzstützende und wahrscheinlich auch netzbildende Aufgaben übernehmen, um eine sichere Energieversorgung gewährleisten zu können. Hier werden neue Regelalgorithmen bzw. Module sowie Funktionalitäten zur Erbringung von Systemdienstleistungen, wie negativer Sekundärregelung, entwickelt, die den steigenden Forderungen hinsichtlich der Netzstützung nachkommen. Zu den aktuellen Aufgaben gehören u. a. die schnelle Variation der eingespeisten

Abbildung 5  
**Antwort der Frequenz auf einen Lastsprung in einem Inselnetz bei unterschiedlichen netzstützenden Funktionen einer WEA**  
 [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]



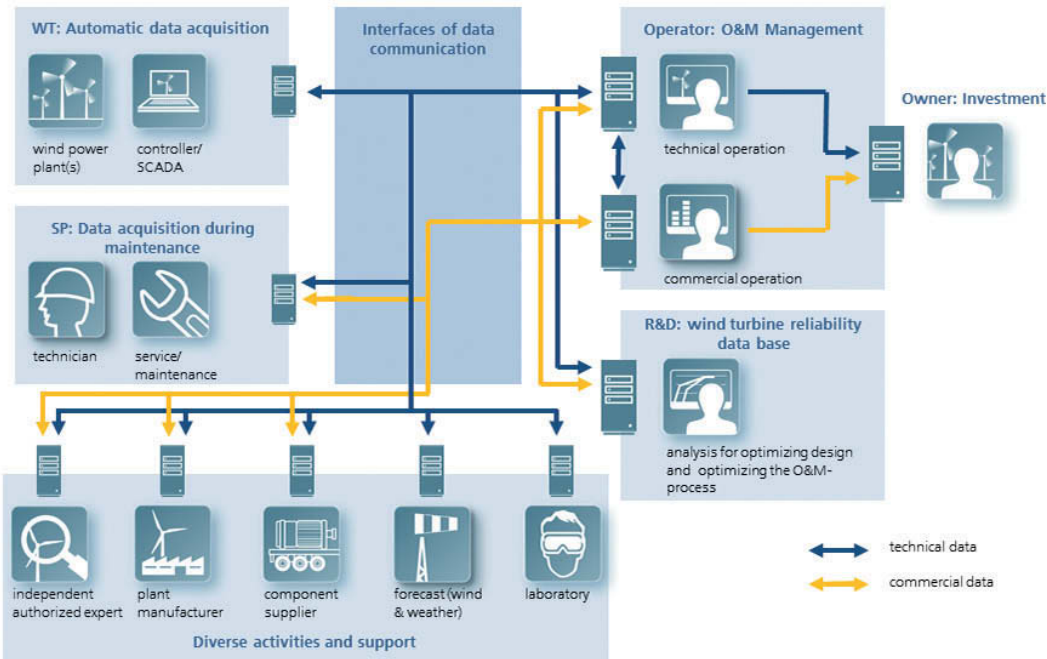


Abbildung 6

**Kommunikationswege zwischen den Rollen in Betrieb und Instandhaltung**  
 [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Für eine situationsabhängige, präventive Instandhaltung sind zukünftig eine systematische und in Teilen automatisierte Datenerfassung sowie eine umfassende Analyse notwendig. Zur Identifizierung von initialen Schäden und der Beobachtung ihrer Weiterentwicklung sind sogenannte Condition-Monitoring-Systeme für alle relevanten Komponenten mit einer typischen, ausgeprägt zeitabhängigen Fehlerentwicklung zu entwickeln.

**Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltauswirkungen und zum Erhalt der Akzeptanz**

Im Zeichen des immer stärker werdenden Interesses der Bevölkerung und der Regulierungsbehörden an einer umweltverträglichen Nutzung der Windenergie kommt auch der Schallemission, der Schallausbreitung und letztlich der Schallimmission rund um die WEA eine wichtige Rolle zu.

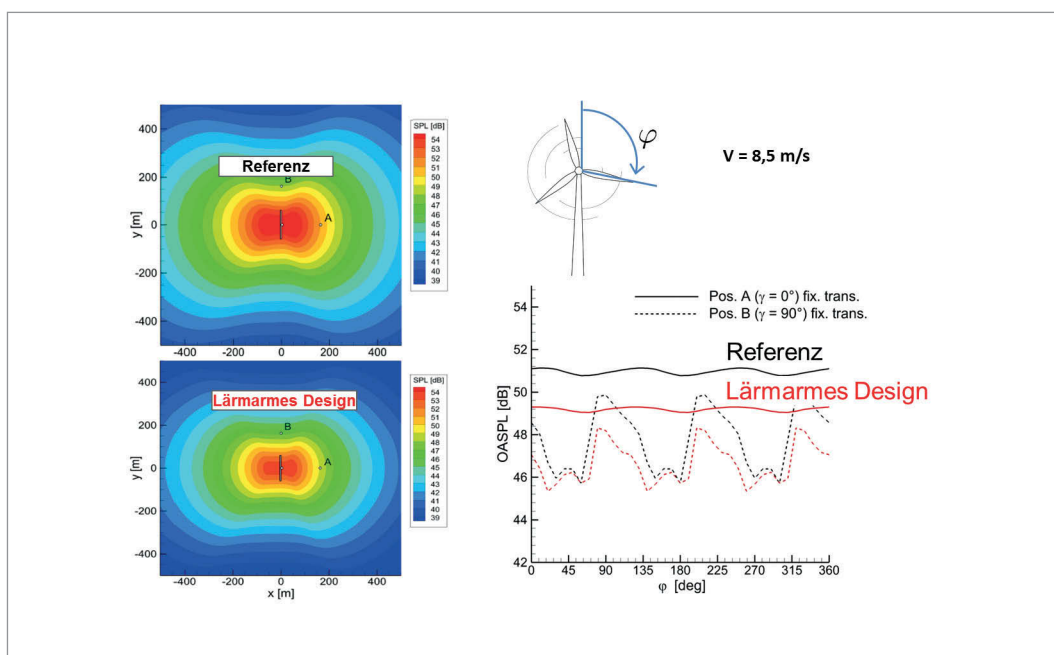


Abbildung 7

**Simulierte Geräuschsignaturen am Boden mit Auswertung der Amplitudenmodulation für zwei Beobachterpositionen über einen Blattumlauf**  
 [Quelle: Rautmann, DLR/Nordex]

Neben Maßnahmen am Blatt gilt es auch zu untersuchen, wann und in welcher Stärke die Geräusche der WEA in der Umgebung nachweisbar sind und wie stark sie vom Gelände, dem Wetter und den Windverhältnissen abhängen (Bedarf nach präziser Lärmvorhersage).

Eine Herausforderung stellt das Phänomen der Amplitudenmodulation dar, wofür derzeit weder validierte Vorhersagemethoden noch geeignete Bewertungsmetriken vorliegen.

Weitere Herausforderungen sind die Erweiterung der 3D-Akustikvorhersagefähigkeiten zur gezielten Designunterstützung, die Nutzung von simulierten Schallfeldern für die Anlagenregelung und die Berücksichtigung komplexer Topografien bei der Schallimmissionsberechnung.

Detaillierte naturschutzfachliche Untersuchungen beschränken sich heute im Wesentlichen auf die erforderlichen Begleituntersuchungen im Rahmen der Genehmigung der Einzelprojekte.

Um Fehler beim weiteren Ausbau zu vermeiden, müssen Auswirkungen wie die Zielkonflikte mit Naturschutz und Landschaftspflege, Beeinträchtigung der Funktionen des Naturhaushalts oder Einfluss auf die Erholungsfunktion umfassend untersucht und aufgearbeitet werden. Dazu sind bereits konsistente naturschutzfachliche Monitoringsysteme im Aufbau, mit denen die Auswirkungen der Windenergienutzung und der Stromtransportinfrastruktur auf Naturschutzgüter erfasst und bewertet werden. Ziel ist es dabei, Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu identifizieren und Optionen zur Gegensteuerung bereit zu stellen.

## Literatur

- [1] Hrsg. AG Energiebilanzen e. V., Stromerzeugung nach Energieträgern 1990–2016, online verfügbar unter: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ausw\\_24juli2017\\_ov.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_24juli2017_ov.pdf)
- [2] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Windenergie Report Deutschland 2016, Kassel, 2017
- [3] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Energiesystem Deutschland 2050, online verfügbar unter [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE\\_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf), zuletzt geprüft am 09.06.2017.
- [4] Hrsg. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, online verfügbar unter [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf), zuletzt geprüft am 10.04.2017
- [5] Hrsg. World Energy Council, World Energy Scenarios 2016. The grand transition, online verfügbar unter [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016\\_Full-Report.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf), zuletzt geprüft am 11.04.2017
- [6] Hrsg. Greenpeace International, energy [r]evolution. A sustainable world energy outlook 2015, Amsterdam 2015